

ANALISA KARAKTERISTIK GAIN SERAT OPTIK ERBIUM DOPED AMPLIFIER MODE TUNGGAL

Akhmad Hambali^{1*} dan Ary Syahriar²

¹Mahasiswa Program Pascasarjana pada Program Studi Opto-Elektroteknika dan Aplikasi Laser, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Salemba Raya 4, Jakarta 10430, Indonesia.

E-mail: hbl@myself.com

²Dit. Teknologi Informasi dan Elektronika, BPPT Building II, 21st Floor, MH. Thamrin No.8,

Jakarta 10340, Indonesia. Telp.: (021) 3169826, 3169835. E-mail: ary@london.com

*korespondensi dapat ditujukan kepada penulis

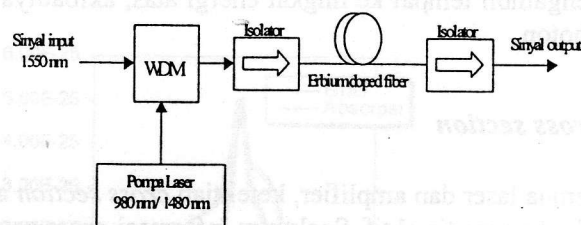
Abstrak

Pada jaringan jarak jauh dibutuhkan beberapa penguat ulang (*repeater*) elektronik untuk memperbaiki pelemahan sinyal yang terjadi. Solusi untuk mengatasinya adalah dengan komponen aktif erbiium doped fiber amplifier (EDFA) yang dapat menguatkan sinyal tanpa harus terlebih dahulu mengubahnya ke dalam sinyal elektronik. Tulisan ini menganalisa secara teoritis hubungan antara karakteristik gain terhadap

daya pompa (*pump power*) pada $\lambda = 980 \text{ nm}$, $\lambda = 1480 \text{ nm}$ dan $\lambda = 1550 \text{ nm}$, serta hubungan antara karakteristik gain terhadap panjang serat pada serat optik erbiium doped amplifier mode tunggal. Sehingga dapat dipahami bagaimana unjuk kerja komponen aktif erbiium doped fiber amplifier (EDFA) tersebut.

1. Pendahuluan

Serat *erbium doped* amplifier terdiri dari beberapa meter serat optik yang *didoped* dengan elemen – elemen *rare earth erbium*. Prinsipnya, laser digunakan untuk memompa serat *erbium doped* dan atom – atom di serat akan berpindah pita energi dari tingkat energi terendah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Sinyal optik yang melewati serat *erbium doped* berfungsi sebagai perangsang sehingga terjadi emisi yang melepaskan energi *photon*. Energi tersebut bersifat koheren dan dengan demikian terjadi penguatan sinyal secara optik. Bagaimanapun kombinasi keistimewaan ini menghasilkan beberapa karakteristik baru yang tidak terdapat di serat optik pada umumnya. Agar analisa secara teori dapat dilakukan lebih khusus maka dikembangkan suatu model penguatan cahaya pada serat *erbium doped*.

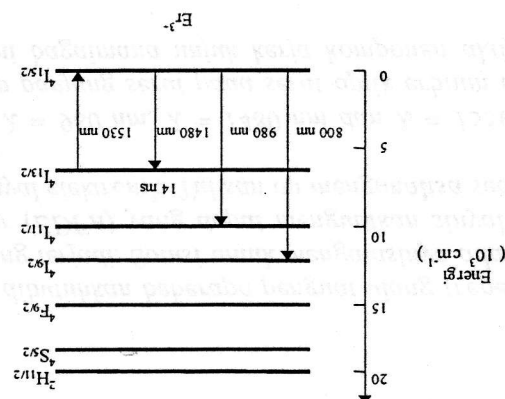


Gambar 1. Blok diagram sistem penguatan serat erbiium doped [23]

2. Gelas silika sebagai bahan dasar

Salah satu alasan sukses dan cepatnya perkembangan EDFA karena telah stabilnya metode teknologi fabrikasi produk serat silika. Hal tersebut penting sekali bagi para pemakai serat *erbium doped amplifier* yang selalu mempercayainya telah memenuhi syarat. Terutama bahwa serat silika *erbium doped* dapat menguatkan sinyal pada panjang gelombang pita transmisi sistem komunikasi optik yaitu 1550 nm.

Seperti telah dijelaskan bahwa bahan aktif *rare-earth* seperti Er^{3+} dapat mengakibatkan terjadinya absorpsi dan emisi. Banyak sekali cara untuk mengilustrasikan kemungkinan terjadinya absorpsi dan emisi yaitu melalui model diagram tingkat energi. Tingkat energi atom dan ion secara konvensional ditandai berdasarkan sifat – sifat momentum *angular* atom dan ion.



Gambar 2. Model tingkat energi dan nilai transisi panjang gelombang [5].

Atom atau ion yang berada di tingkat energi tersebut ditandai dengan $^{35} + ^1L_J$ dimana S adalah nomor kuantum *spin*, J adalah nomor total kuantum momentum *angular*, dan L sebagai nomor orbit kuantum momentum *angular* didefinisikan dengan huruf $S, P, D, F, G, H, I, \dots$, sekaligus $L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$. Pada *host lattice* dan dikenal sebagai medan – medan kristal. Hal ini menyebabkan *Stark splitting* orbit – orbit ion *rare-earth* (J manifold), dan bermacam – macam medan mengakibatkan sifat dasar gelas tidak terbentuk.

Ketika ion dipompa untuk kondisi di tingkat energi laser atas, maka kondisi di tingkat ini disebut dengan *metastable*. Selama hal tersebut berlangsung terjadilah peralihan *electric dipole* antara tingkat – tingkat *Stark* pada *multiplet LSJ* yang berbeda, sehingga mengakibatkan *lifetime* di tingkat atas. Gambar 2.1 memperlihatkan sistem laser tiga tingkat dimana tingkat *lasing* terendah memiliki suhu populasi yang cukup berarti. Pada sistem ini sinyal absorpsi dari keadaan dasar secara langsung mengambil tempat ke tingkat energi atas, akibatnya sinyal tersebut bersaing dengan emisi stimulasi *photon*.

3. Menentukan cross section

Seperti dengan semua laser dan amplifier, ketelitian *cross section* adalah penting untuk alat berkualitas yang memanfaatkan media aktif. Spektrum informasi *cross section* emisi dan informasi *cross section* absorpsi pada sebuah serat *erbium doped* merupakan hal terpenting untuk menjelaskan sifat – sifatnya. Karena itu metode lainnya untuk menentukan kekuatan peralihan juga perlu. Metode tersebut tentu dengan mengukur secara langsung panjang gelombang bebas *cross section* emisi σ_e dan *cross section* absorpsi σ_a .

Apabila tidak ada ion *erbium* yang dieksitasi, *cross section* absorpsi dapat ditentukan secara langsung dari suatu pengukuran redaman,

$$\sigma_a(\nu) = \frac{att(\nu)}{10 \log_{10}(e) 2\pi \int_0^{adot} \rho_{Er}(r) I^{01}(\nu, r) r dr} \quad (3.1)$$

Dimana $att(\nu)$ adalah redaman yang disebabkan *erbium* dalam decibel per meter pada frekwensi ν . $\rho_{Er}(r)$ adalah konsentrasi *erbium*, $adot$ adalah jari – jari *erbium dopant*, dan $I^{01}(\nu, r)$ adalah normalisasi intensitas *mode* LP₀₁, yang ditentukan berdasarkan,

$$2\pi \int_0^\infty I^{01}(\nu, r) r dr = 1 \quad (3.2)$$

Cross section emisi dapat ditentukan dari pengukuran *gain*, anggap bahwa semua ion *erbium* tereksitasi,

$$\sigma_e(\nu) = \frac{g(\nu)}{10 \log_{10}(e) 2\pi \int_0^{adot} \rho_{Er}(r) I^{01}(\nu, r) r dr} \quad (3.3)$$

Dimana $g(\nu)$ adalah *gain* dalam decibel per meter pada frekwensi ν .

Menentukan *cross section* dengan menggunakan persamaan (3.1) dan (3.3) tersirat disana suatu ketelitian yang diketahui dari integral antara konsentrasi ion *erbium* dan *mode* LP₀₁. Karena itu hal ini dianggap bahwa hanya *mode* LP₀₁ yang merambat diserat dan yang sangat penting, ini sulit sekali untuk menyelesaikan syarat bahwa semua ion *erbium* tereksitasi. Sehingga *cross section* emisi dapat ditentukan dari bentuk spektrum fluoresensi, $I_e(\nu)$, dan harga emisi spontan, $A_e = 1/\tau_{21}$. Disini τ_{21} merupakan lifetime radiasi. Berikut ini adalah persamaan yang diturunkan dari persamaan Fuchtbauer – Ladenburg,

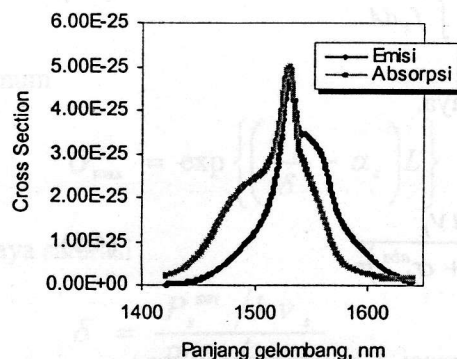
$$\sigma_e(\nu) = \frac{A_e \lambda^2}{8\pi n^2} \cdot \frac{I_e(\nu)}{\int I_e(\nu) d\nu} \quad (3.4)$$

Dimana n adalah indeks bias dan λ adalah panjang gelombang rata – rata.

Spektrum *cross section* absorpsi dapat juga ditentukan dari bentuk spektrum redaman, $I_a(\nu)$, berdasarkan persamaan Fuchtbauer – Ladenburg,

$$\sigma_a(\nu) = \frac{A_e \lambda^2}{8\pi n^2} \cdot \frac{I_a(\nu)}{\int I_a(\nu) d\nu} \cdot \frac{2J_2 + 1}{2J_1 + 1} \quad (3.5)$$

Dimana J_1 dan J_2 adalah nomer *quantum momentum angular* untuk kondisi *ground state* dan kondisi eksitasi. Dengan menggunakan persamaan (3.4) dan (3.5) bentuk spektrum *cross section* emisi dan spektrum *cross section* absorpsi dapat dilihat seperti gambar 3 berikut ini :



Gambar 3. Spektrum *cross section* absorpsi dan *cross section* emisi

4. Karakteristik gain

Panjang gelombang pompa dapat ditentukan secara bebas dari keadaan eksitasi absorpsi (Exited State Absorption), misalnya 980 dan 1480 nm. Perambatan gelombang sinyal dan pompa dijelaskan dengan menyusun persamaan yang hanya menghitung populasi atom tingkat energi atas dapat merubah intensitas sinyal dan intensitas pompa.

$$N_z = -\tau \sum_{j=p,s} u_j \frac{1}{h\nu_j} \frac{\partial I_j}{\partial z} \quad (4.1)$$

Disini u_j menunjukkan arah perambatan pompa ($j = p$) dan sinyal gelombang ($j = s$). Dimana $u_j = +1$ untuk arah z positif dan begitu pula sebaliknya. τ adalah *lifetime* spontan di tingkat energi atas, ν_j energi photon, I_j intensitas. Amplifikasi intensitas $I_k(k = p, s)$ didefinisikan sebagai berikut :

$$\frac{\partial I_k}{\partial z} = u_k I_k (N_z (\sigma_{em}^k + \sigma_{abs}^k) - N \sigma_{abs}^k) \quad (4.2)$$

σ_{em}^k dan σ_{abs}^k adalah *cross section* emisi dan absorpsi. Populasi di tingkat energi bawah N_1 terkait dengan konsentrasi erbiun $N = p$ dimana $N_1 = N - N_2$. Sebelum beralih ke integrasi terhadap koordinat z , persamaan (4.2) harus diintegrasikan terhadap *cross section* serat. Jika dimasukkan N_2 ke persamaan (4.2) maka jelas ketergantungan distribusi erbiun di bagian pertama tanda kurang besar persamaan (4.2) menjadi hilang. Namun di bagian ini ditempatkan intensitas dengan masing – masing mode daya P . Persamaan (4.2) kemudian memberikan :

$$u_k \frac{\partial P}{\partial z} = -P \left(\alpha_k + \frac{1}{I_{sat}} \sum_{j=p,s} u_j \gamma_j \frac{\lambda_j}{\lambda_k} C_{kj} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (4.3)$$

Dimana C_{kj} adalah faktor *overlap* dan α_k adalah koefisien absorpsi sinyal kecil (*small signal*) yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\alpha_k = \sigma_{abs}^k \frac{\int N f_k dA}{\int f_k dA} \quad (4.4)$$

dengan f_k adalah fungsi mode medan daya. dan intensitas saturasi :

$$I_{sat}^k = \frac{h\nu_k}{\left(\sigma_{em}^k + \sigma_{abs}^k \right) \tau} \quad (4.5)$$

Integrasi persamaan (4.3) dari $z = 0$ sampai $z = L$ menghasilkan :

$$P_{out}^k = P_{in}^k \exp \left\{ -\alpha_k L + \frac{1}{I_{sat}^k} \sum_{j=p,s} \gamma_j \frac{\lambda_j}{\lambda_k} C_{kj} (P_{in}^j - P_{out}^j) \right\} \quad (4.6)$$

Umumnya koefisien C_{kj} adalah daya bebas, tetapi untuk daya yang cukup tinggi atau untuk doping erbium terbatas seluruhnya diatur konstan. Nilainya ditentukan oleh hanya satu panjang gelombang pompa dan satu panjang gelombang sinyal. Untuk daya pompa yang sangat tinggi dan daya sinyal diabaikan maka dapat ditetapkan dari persamaan (4.2) bahwa pendekatan populasi di tingkat energi atas $N_2 = N\sigma_p^{abs}/(\sigma_p^{abs} + \sigma_p^{em})$.

Kemudian daya pompa absorpsi adalah :

$$P_p^{abs} = \frac{h\nu_p}{\tau} \frac{1}{1 + \frac{\sigma_p^{em}}{\sigma_p^{abs}}} L \int N dA \quad (4.7)$$

Gain maksimum dicapai dengan mengintegalkan persamaan (4.2) terhadap *mode* medan sinyal.

$$G_{max} = \exp \left\{ \alpha_s L \frac{\frac{\sigma_s^{em}}{\sigma_s^{abs}} - \frac{\sigma_p^{em}}{\sigma_p^{abs}}}{1 + \frac{\sigma_p^{em}}{\sigma_p^{abs}}} \right\} \quad (4.8)$$

Penjelasan yang sama diberikan untuk daya sinyal absorpsi pada daya input yang tinggi dan untuk faktor transmisi pada panjang gelombang pompa dimana daya pompa diabaikan. Diperoleh dari persamaan (4.6) $C_{kj}/I_k^{sat} = 1/P_k^{sat}$ dengan,

$$P_k^{sat} = I_k^{sat} \frac{\int N dA \int f_k dA}{\int N f_k dA} \quad (4.9)$$

Secara jelas pada persamaan (4.6) untuk pompa dapat ditulis $k = p$ dan gelombang sinyal $k = s$. Kemudian dari sini dapat dipisahkan daya pompa output P_p^{out} dan daya pompa absorpsi $P_p^{in} - P_p^{out}$ dari persamaan sinyal serta memasukkannya ke persamaan pompa. Setelah didapatkan beberapa modifikasi dengan menggunakan *gain* sinyal $G = P_s^{out}/P_s^{in} = \exp(\rho\sigma_e L)$ maka :

$$\frac{P_p^{in}}{h\nu_p} \left(1 - \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^\delta \right) = \frac{P_s^{sat}}{h\nu_s} (\alpha_s L + \ln(G)) + \frac{P_s^{in}}{h\nu_s} (G - 1) \quad (4.10)$$

Dengan *gain* maksimum

$$G_{max} = \exp \left\{ \left(\frac{\alpha_p}{\delta} - \alpha_s \right) L \right\} \quad (4.11)$$

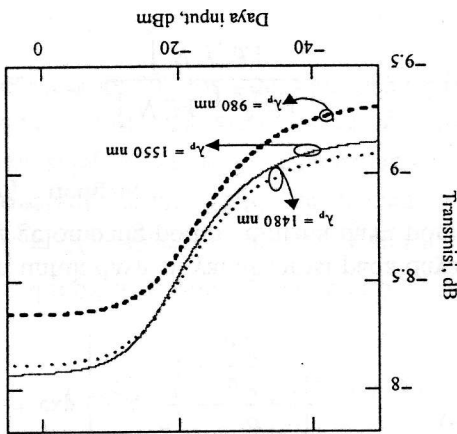
dan perbandingan daya saturasi

$$\delta = \frac{P_s^{sat}/h\nu_s}{P_p^{sat}/h\nu_p} \quad (4.12)$$

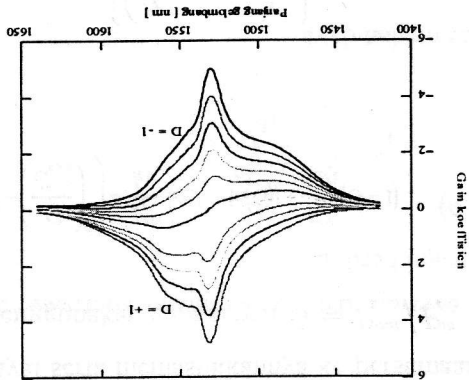
Pada sisi bagian kiri dari persamaan (4.6) menunjukkan jumlah photon pompa absorpsi per satuan waktu. Sedangkan pada sisi bagian kanan berhubungan dengan laju photon emisi spontan serta jumlah photon dengan sinyal per satuan waktu.

5. Kesimpulan

Dapat dilihat dari analisa bahwa Gain koefisien dalam kondisi negatif ketika semua ion Er^{3+} berada pada tahapan tingkat energi dasar dan ketika ion Er^{3+} tereksitasi maka kondisi gain koefisien adalah positif sehingga serat *erbium doped amplifier* 5 m ketika di pompa pada panjang gelombang $\lambda = 980$ nm adalah - 8.4 dBm, panjang gelombang $\lambda = 1480$ nm adalah - 8.2 dBm dan panjang gelombang $\lambda = 1550$ nm adalah - 8.15 dBm dengan daya input - 10 dBm.



Gambar 4. Sinyal gain koefisien



Gambar 5. Daya transmisi pada serat erbium doped amplifier L = 5 m

6. Daftar Pustaka

- [1] C. Millar (A), "All light now, fiber amplifier and their impact on telecom", BTRL, IEE Review, 35 – 39, 1991.
- [2] Donald Keck, "A future full light", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Volume 6, 1254 – 1258, 2000.

- [3] E.Desurvire, "Lightwave communication : The fifth generation", Scientific American, 96 – 103, 1992.
- [4] H. Cherin, "An introduction to optical fiber", Mc Graw-Hill, New York, 1983.
- [5] S. Ungar, "Fiber optics, theory and applications", John Willey & Son, Ltd., England, 1990.
- [6] E.Desurvire, "Erbium doped fiber amplifier, principles and applications", John Willey & Son, Inc., New York, 1994.
- [7] D. A. Chapman, "Erbium doped fiber amplifier : the latest revolution in optical communications", Electronics & Communications Engineering Journal, 59 – 67, 1994.
- [8] Th. Pfeiffer, H. Bulow, "Analytical gain equation for erbium doped fiber amplifiers including mode field profiles and dopant distribution", IEEE Phot. Tech. Lett., Volume 4, 449 – 457, 1992.
- [9] E.Desurvire, J.R Simpson, "Amplification of spontaneous emission in erbium doped single mode fiber", IEEE Journal of Lightwave Technology, Volume 7, 835 – 845, 1989.
- [10] A. Bjarklev, "Optical fiber amplifiers : design and system applications", Artech house, London, 1993.

1. Pendahuluan

Dalam wilayah kota-kota besar masalah yang dihadapi akan selalu dihadapkan pada kelangkaan kebutuhan yang sejalan dan masyarakat atau penduduk kota-kota tersebut. Pada dasarnya penggunaan indefinite integral sangat berkaitan pada spesifikasi dari hubungan fungsional untuk akumulasi berbagai macam stok barang (stock of capital goods) atau pembentukan modal (capital formation) yang sangat dibutuhkan pada masyarakat kota-kota tersebut.

Hubungan fungsional ini pada umumnya sering dibahas (dianalisis) pada tingkat nasional dengan berbagai persoalan ekonominya dan juga pada tingkat wilayah dan kota-kota besar (municipal) dengan terutama membahas kesejahteraan ekonominya. Dalam hal ini apabila pembentukan modal dapat diproduksi secara terus menerus selama bertahapan.

Demikian pula nilai dari stok kapital pada setiap point dalam waktu, dapat dinyatakan sebagai fungsi dari waktu. Tingkat dari pembentukan kapital atau kelayakan pada investasi baru yang mengikuti setiap waktu harus dapat diketahui untuk membahas total stok kapital.

Indefinite integral dapat menguraikan suatu fungsi integral untuk pembentukan kapital dengan mengetahui tingkat dari kelayakan investasi baru pada setiap waktu. Dengan demikian dapat menggunakan notasi:

t = Sebagai waktu dalam tahun, bulan atau hari

$K(t)$ = Sebagai nilai stok kapital pada setiap waktu t